

6-5 光分子科学研究領域

光分子科学第二研究部門

大 森 賢 治 (教授) (2003 年 9 月 1 日着任)

素川 靖司 (助教)

DE LÉSÉLEUC, Sylvain (助教)

富田 隆文 (特任助教 (分子科学研究所特別研究員))

BHARTI, Vineet (特任研究員)

國見 昌哉 (特任研究員)

CHEW, Yeelai (大学院生)

TIRUMALASETTY PANDURANGA, Mahesh (大学院生)

VILLELA ESCALANTE, Rene Alejandro (大学院生)

川本 美奈子 (事務支援員)

A-1) 専門領域：量子物理学, 原子分子光物理学, 量子情報科学, 物理化学

A-2) 研究課題：

- a) アト秒精度のコヒーレント制御法の開発
- b) 量子論の検証実験
- c) コヒーレント分子メモリーの開発
- d) 分子ベースの量子情報科学
- e) 強レーザー場非線形過程の制御
- f) バルク固体の極限コヒーレント制御
- g) 超高速量子シミュレータの開発
- h) 超高速量子コンピュータの開発

A-3) 研究活動の概略と主な成果

- a) コヒーレント制御は、物質の波動関数の位相を操作する技術である。その応用は、量子コンピューティングや結合選択的な化学反応制御といった新たなテクノロジーの開発に密接に結び付いている。コヒーレント制御を実現するための有望な戦略の一つとして、物質の波動関数に波としての光の位相を転写する方法が考えられる。例えば、二原子分子に核の振動周期よりも短い光パルスを照射すると、「振動波束」と呼ばれる局在波が結合軸上を行ったり来たりするような状態を造り出す事ができる。波束の発生に際して、数フェムト秒からアト秒のサイクルで振動する光電場の位相は波束を構成する各々の振動固有状態の量子位相として分子内に保存されるので、光学サイクルを凌駕する精度で光の位相を操作すれば波束の量子位相を操作することができる。我々はこの考えに基づき、独自に開発したアト秒位相変調器 (APM) を用いて、二つのフェムト秒レーザーパルス間の相対位相をアト秒精度で操作するとともに、このパルス対によって分子内に発生した二つの波束の相対位相を同様の精度で操作する事に成功した。さらに、これらの高度に制御された波束干渉の様子を、ピコメートルレベルの空間分解能とフェムト秒レベルの時間分解能で観測する事に成功した。

- b) APMを用いて、分子内の2個の波束の量子干渉を自在に制御する事に成功した。また、この高精度量子干渉をデコヒーレンス検出器として用いる事によって、熱的な分子集団や固体中の電子的なデコヒーレンスを実験的に検証した。さらに、固体パラ水素中の非局在化した量子状態 (vibron) の干渉を観測し制御する事に成功した。
- c) 光子場の振幅情報を分子の振動固有状態の量子振幅として転写する量子メモリの開発を行なった。ここでは、フェムト秒光パルス対によって分子内に生成した2個の波束間の量子位相差をアト秒精度で操作し、これらの干渉の結果生成した第3の波束を構成する各振動固有状態のポピュレーションを観測することによって、光子場の振幅情報が高精度で分子内に転写されていることを証明することができた。また、フェムト秒光パルス対の時間間隔をアト秒精度で変化させることによって波束内の固有状態のポピュレーションの比率を操作できることを実証した。さらに、固体パラ水素中の振動量子状態 (vibron) の位相情報の2次元分布を操作し可視化することによって、固体2次元位相メモリの可能性を実証することに成功した。
- d) 分子メモリーを量子コンピュータに発展させるためには、c)で行ったポピュレーション測定だけでなく、位相の測定を行う必要がある。そこで我々は、c)の第3の波束の時間発展を別のフェムト秒パルスを用いて実時間観測した。これによって、ポピュレーション情報と位相情報の両方を分子に書き込んで保存し、読み出すことが可能であることを実証した。振動固有状態の組を量子ビットとして用いる量子コンピュータの可能性が示された。さらに、分子波束を用いた量子フーリエ変換を開発した。
- e) 分子の振動波束を構成する振動固有状態の振幅と位相を強レーザー場で制御することに成功した。
- f) バルク固体中の原子の超高速2次元運動をフェムト秒単位で制御し画像化する新しい光技術を開発した。
- g) ほぼ絶対零度 (~50 ナノケルビン) まで冷やした極低温のルビジウム原子をマイクロレベルで整列させた人工原子結晶にアト秒精度のコヒーレント制御法を適用することによって、3万個の粒子の量子多体問題を近似無しに1ナノ秒 (ナノ = 10^{-9}) 以内でシミュレートできる世界唯一・最速の「超高速量子シミュレータ」を開発することに成功した。それぞれ異なる研究分野で発展してきた「超高速化学」と「極低温物理」の手法を融合させた世界初の試みであり、材料科学・固体物理・溶液化学など広範囲の領域に波及効果を及ぼす新しい方法論として期待されている。
- h) 上記の人工原子結晶とアト秒精度のコヒーレント制御法を組み合わせた世界唯一・最速の「超高速量子コンピュータ」の開発を進めている。

B-1) 学術論文

素川靖司, 富田隆文, Sylvain de LÉSÉLEUC, 安藤太郎, 武井宣幸, 大森賢治, 「アト秒精度の極低温・超高速量子シミュレータ」, *固体物理*, **56**, 243–256 (2021). (招待論文・表紙)

Y. OHTSUKI, T. NAMBA, H. KATSUKI and K. OHMORI, “Optimal Control for Suppressing Wave Packet Spreading with Strong Non-Resonant Laser Pulses,” *Phys. Rev. A* **104**, 033107 (12 pages) (2021).

H. KATSUKI, Y. OHTSUKI, T. AJIKI, H. GOTO and K. OHMORI, “Engineering Quantum Wave-Packet Dispersion with a Strong Non-Resonant Femtosecond Laser Pulse,” *Phys. Rev. Res.* **3**, 043021 (9 pages) (2021).

Y. CHEW, T. TOMITA, T. P. MAHESH, S. SUGAWA, S. de LÉSÉLEUC and K. OHMORI, “Ultrafast Energy Exchange between Two Single Rydberg Atoms on the Nanosecond Timescale,” *arXiv:2111.12314* (2021).

V. BHARTI, S. SUGAWA, M. MIZOGUCHI, M. KUNIMI, Y. ZHANG, S. de LÉSÉLEUC, T. TOMITA, T. FRANZ, M. WEIDEMÜLLER and K. OHMORI, “Ultrafast Many-Body Dynamics in an Ultracold Rydberg-Excited Atomic Mott Insulator,” *arXiv:2201.09590* (2021).

A. R. PERRY, S. SUGAWA, F. SALCES-CARCOBA, Y. YUE and I. B. SPIELMAN, “Multiple-Camera Defocus Imaging of Ultracold Atomic Gases,” *Opt. Express* **29**, 17029–17041 (2021).

S. SUGAWA, F. SALCES-CARCOBA, Y. YUE, A. PUTRA and I. B. SPIELMAN, “Wilson Loop and Wilczek-Zee Phase from a Non-Abelian Gauge Field,” *npj Quantum Inf.* **7**, 144 (9 pages) (2021).

M. KUNIMI and I. DANSHITA, “Nonergodic Dynamics of the One-Dimensional Bose-Hubbard Model with a Trapping Potential,” *Phys. Rev. A* **104**, 043322 (9 pages) (2021).

M. KUNIMI, K. NAGAO, S. GOTO and I. DANSHITA, “Performance Evaluation of the Discrete Truncated Wigner Approximation for Quench Dynamics of Quantum Spin Systems with Long-Range Interactions,” *Phys. Rev. Res.* **3**, 013060 (15 pages) (2021).

B-4) 招待講演

大森賢治, 「アト秒精度の超高速・極低温量子シミュレータ・量子コンピュータ」, (一社)日本光学会 光エレクトロニクス産学連携専門委員会 第328回研究会「光の日」公開シンポジウム, オンライン開催, 2022年3月.

大森賢治, 紫綬褒章受章記念講演(文部科学省主催)「アト秒精度の極限コヒーレント制御——量子制御から量子情報処理へ——」, 光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)第4回シンポジウム, 文部科学省, オンライン開催, 2022年2月.

大森賢治, 「アト秒精度の超高速量子シミュレータ開発と量子コンピュータへの応用」, ソニーグループ(株)社内セミナー, ソニーグループ(株), オンライン開催, 2022年1月.

K. OHMORI, “Ultrafast and ultracold quantum simulator/computer with attosecond precision,” Quantum Simulations and Computations with Cold Atoms-2022 (QSCCA 2021), TCG CREST/IISER PUNE, India (Online), January 2022.

K. OHMORI, “Japan’s quantum-technology testbeds,” The International Symposium on Quantum Science, US DOE Office of Science (SC) Workshop on the International Quantum Computing Testbeds, Quantum Computing Testbeds Stakeholder Workshop, US DOE Office of Science (SC), USA (Online), December 2021. (Invited Talk/Panel Discussion)

K. OHMORI, “Ultrafast and ultracold quantum simulator/computer with attosecond precision,” The International Symposium on Quantum Science, Technology and Innovation (QUANTUM INNOVATION 2021), RIKEN, Japan (Online), December 2021.

K. OHMORI, “Ultrafast and ultracold quantum simulator with attosecond precision,” 5th International Workshop on Rydberg Atoms and Molecules, Wuhan University, China (Online), October 2021.

K. OHMORI, “Ultrafast and ultracold quantum simulator with attosecond precision,” IAS Center for Quantum Technologies Inaugural Workshop, The Hongkong University of Science and Technology (HKUST), China (Online), August 2021.

K. OHMORI, “Ultrafast and ultracold quantum simulator/computer with attosecond precision,” U.S.-Japan Quantum Cooperation Workshop, 米国・Hudson Institute／日本・内閣府, Online, July 2021. (Invited Talk/Panel Discussion)

K. OHMORI, “Ultrafast and ultracold quantum simulator with attosecond precision,” DAMOP 2021 (52nd Annual Meeting of the American Physical Society’s Division of Atomic, Molecular and Optical Physics), Online, June 2021.

大森賢治(コメンテータ), 第13回理研・未来戦略フォーラム「生命科学の未来」, 理研, オンライン開催, 2021年5月.

素川靖司, 「光格子を用いたアト秒精度の極低温・超高速多体量子シミュレータの開発」, 第1回Q-LEAP次世代レーザー領域シンポジウム, オンライン開催, 2021年8月.

S. de LÉSÉLEUC, “Ultrafast energy exchange between two single Rydberg atoms on the nanosecond timescale,” GiRyd 2022 workshop, Mainz (Germany), March 2022.

B-5) 特許出願

特許取得第 6875680 号, 「量子シミュレーターおよび量子シミュレーション方法」, 酒井寛人 (浜松ホトニクス), 大森賢治 (自然科学研究機構), 安藤太郎 (浜松ホトニクス), 武井宜幸 (自然科学研究機構), 豊田晴義, 大竹良幸, 兵土知子, 瀧口優 (浜松ホトニクス) (登録日 2021 年 4 月 27 日).

B-6) 受賞, 表彰

大森賢治, 令和 3 年秋紫綬褒章 (量子物理学研究功績) (2021).

B-7) 学会および社会的活動

学会の組織委員等

原子・分子・光科学 (AMO) 討論会プログラム委員 (2003–).

European Commission, HORIZON 2020, EU Future and Emerging Technologies, Scientific and Industrial Advisory Board (SIAB) (2017–).

European Science Foundation (ESF), ESF College of Expert Reviewers (2018–).

iSAP HAMAMATSU (International Symposium on Advanced Photonics) 組織委員 (2016–).

ゴードン研究会議 (Gordon Research Conference: GRC) “Quantum Control of Light and Matter,” 2021 議長 (Covid-19 パンデミックのため 2023 年に延期), 2019 副議長 (2017–).

ゴードン会議 (Gordon Research Conference: GRC) 評議会メンバー (2019–).

文部科学省, 学術振興会, 大学共同利用機関等の委員等

文部科学省 科学技術・学術審議会 専門委員 (2015–).

文部科学省 科学技術・学術審議会 量子科学技術委員会 主査代理 (2015–).

科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 (CREST) 研究領域「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」(研究総括: 荒川泰彦) 中間評価委員 (2020–2021).

学会誌編集委員

Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, IOP, UK, Editorial Board (2018–2021), Executive Editorial Board (2021–) and Section Editor for Quantum Technologies (2019–).

その他

米国エネルギー省 (DOE) および EU からの招待を受け, DOE が主催する量子コンピューティングに関する米欧政府間会議 (Quantum Computing Testbeds Stakeholder Workshop, 2021 年 12 月 17 日) に主要メンバーかつ唯一の米欧以外からの講演者・パネリストとして出席し, 日本政府代表として大森自身の量子コンピュータ開発と日本の量子技術開発の現状に関する招待講演を行うとともに, 今後の日米欧協力と量子コンピュータ開発の今後の展望に関する議論を先導することによって, 日米欧の政府および科学技術コミュニティに対する分子研のプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献.

内閣府からの依頼で、内閣府とHudson研究所(米国の政府系シンクタンク)が主催する量子技術に関する日米政府間会議(2021年7月1日)で招待講演およびパネルディスカッションを行うことで日米政府に対する分子研のプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

文部科学省からの依頼で、文部科学省と欧州共同体(EC)が主催する量子技術に関する日欧政府間会議(2021年7月6日, 2021年9月13日;文科省・内閣府・経産省・総務省・JSTが出席)に主要メンバーかつ唯一の研究者(他は政府官僚が主体)として出席し、日欧協力政策に関する議論を先導することによって、日欧政府に対する分子研のプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

文部科学省 科学技術学術審議会 量子科学技術委員会の主査代理 専門委員(2015-)として、量子テクノロジー開発および分子研UVSORを含む量子ビーム(放射光施設・大型レーザー施設)利用推進に関する政策検討に大きく貢献。

世界最高レベルの学術会議である米国ゴードン研究会議(Gordon Research Conference: GRC)の評議会メンバー(2019-)としてGRCの運営に貢献することによって、科学技術分野全般における分子研の国際的なプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

量子科学技術分野における世界最高レベルの学術会議であるゴードン研究会議(Gordon Research Conference: GRC)“Quantum Control of Light and Matter”の2021年会議 議長(Covid-19パンデミックのため2023年に延期)、および2019年会議 副議長として2017年から2023年の長期に渡り、GRCの運営に貢献することによって、量子科学技術分野における分子研の国際的なプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

日本を代表するベンダー企業に向けた社内セミナーで、分子研・大森グループ・量子シミュレータ/量子コンピュータラボの研究開発状況をレクチャーし、日本の産業界における分子研のプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

ソニーグループ(株)社内セミナー(2022年1月25日)で、分子研・大森グループ・量子シミュレータ/量子コンピュータラボの研究開発状況をレクチャーし、日本の産業界における分子研のプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

米国を代表する量子テクノロジー企業と研究交流を進めることによって米国の産業界における分子研のプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

日本を代表する商社からの要望で、量子テクノロジーに関するレクチャーを行うことによって、日本の投資業界における分子研のプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

ごく最近(2022年3月-)、民間金融機関から、戦略的提携関係にある米国ベンチャーキャピタルの活用に関して、分子研 戦略室の産学連携担当を通じて、分子研・大森グループ・量子シミュレータ/量子コンピュータラボへの引き合いがあり、協議を進めている。これによって、日米における分子研のプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

文部科学省 科学技術学術政策局 研究開発基盤課 量子研究推進室からの要請で、大森グループの超高速量子シミュレータ・量子コンピュータラボの研究開発状況をレクチャー(2021年8月24日)することによって日本政府に対する分子研のプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

文部科学省 文部科学戦略官(兼)科学技術・学術政策局 研究開発戦略課 戦略研究推進室のメンバーに対して、大森グループの超高速量子シミュレータ・量子コンピュータラボの研究開発状況に関するレクチャーおよびラボツアー(2021年11月26日)を行うことによって、日本政府に対する分子研のプレゼンス向上と研究力アピールに大きく貢献。

B-8) 大学での講義, 客員

総合研究大学院大学物理科学研究科, 集中講義「量子動力学」, 2021年2月3日, 5日, 8日, 10日.

Heidelberg University, 客員教授(フンボルト賞受賞者), 2012年-.(2020年度後期および2021年度はcovid-19パンデミックに起因する渡航規制のため, Heidelberg大学物理学科の教員および大学院生とオンライン(Zoom)で議論・指導を進めた)

B-10) 競争的資金

文部科学省「光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)」量子情報処理・大規模基礎基盤研究, 「アト秒ナノメートル領域の時空間光制御に基づく冷却原子量子シミュレータの開発と量子計算への応用」, 大森賢治(2018年-2028年), 内閣府官民研究開発投資拡大プログラム(PRSIM), 「超高速・高機能な冷却原子型量子シミュレータ・コンピュータの高度化」, 大森賢治(2021年-2028年).

科研費特別推進研究, 「アト秒精度の超高速コヒーレント制御を用いた量子多体ダイナミクスの探求」, 大森賢治(2016年-2021年).

科研費基盤研究(B), 「強相関リユードベリ原子を用いた非平衡量子開放系の量子シミュレーション」, 素川靖司(2021年-2025年).

科研費研究活動スタート支援, 「Rydberg atoms at sub-micron distance with overlapping electronic clouds」, Sylvain de LÉSÉLEUC(2019年-2022年).

科研費研究活動スタート支援, 「冷却原子の個別観測と事後選択的統計処理に基づく開放量子多体系の研究」, 富田隆文(2019年-2022年).

B-11) 産学連携

浜松ホトニクス(株), 「超高速量子シミュレータの開発」, 大森賢治(2016年-). (上記B-10)競争的資金に記載した「科研費・特別推進研究」の共同研究機関, 「Q-LEAP」および「PRISM」の協力研究機関として参画)

C) 研究活動の課題と展望

今後我々の研究グループでは, APMを高感度のデコヒーレンス検出器として量子論の基礎的な検証に用いると共に, より自由度の高い量子位相操作技術への発展を試みる。そしてそれらを希薄な原子分子集団や凝縮相に適用することによって, 「アト秒量子エンジニアリング」と呼ばれる新しい領域の開拓を目指している。当面は以下の5テーマの実現に向けて研究を進めている。

- ① デコヒーレンスの検証と抑制: デコヒーレンスは, 物質の波としての性質が失われて行く過程である。量子論における観測問題と関連し得る基礎的に重要なテーマであるとともに, テクノロジーの観点からは, 反応制御や量子情報処理のエラーを引き起こす主要な要因である。その本質に迫り, 制御法を探索する。
- ② 量子散逸系でのコヒーレント制御の実現: ①で得られる知見をもとにデコヒーレンスの激しい凝縮系でのコヒーレント制御法を探索する。
- ③ 原子・分子ベースの量子情報科学の開拓: アト秒精度の超高速コヒーレント制御技術によって, 原子・分子内の電子・振動固有状態を用いるユニタリ変換とそれに基づく量子情報処理の確立を目指す。さらに, 単一原子・分子の操作・読み出し技術の開発を進める。
- ④ 超高速量子シミュレータの開発: ほぼ絶対零度(~ 50 ナノケルビン)まで冷やした極低温のルビジウム原子をミクロン

レベルで整列させた人工原子結晶とアト秒精度の超高速コヒーレント制御技術を組み合わせた世界唯一・最速の「超高速量子シミュレータ」のさらなる高機能化を目指す。

- ⑤ 超高速量子コンピュータの開発：極低温のルビジウム原子をマイクロレベルで整列させた人工原子結晶とアト秒精度の超高速コヒーレント制御技術を組み合わせた世界唯一・最速の「超高速量子コンピュータ」の開発を進める。

これらの研究の途上で量子論を深く理解するための何らかのヒントが得られるかもしれない。その理解はテクノロジーの発展を促すだろう。我々が考えている「アト秒量子エンジニアリング」とは、量子論の検証とそのテクノロジー応用の両方を含む概念である。